



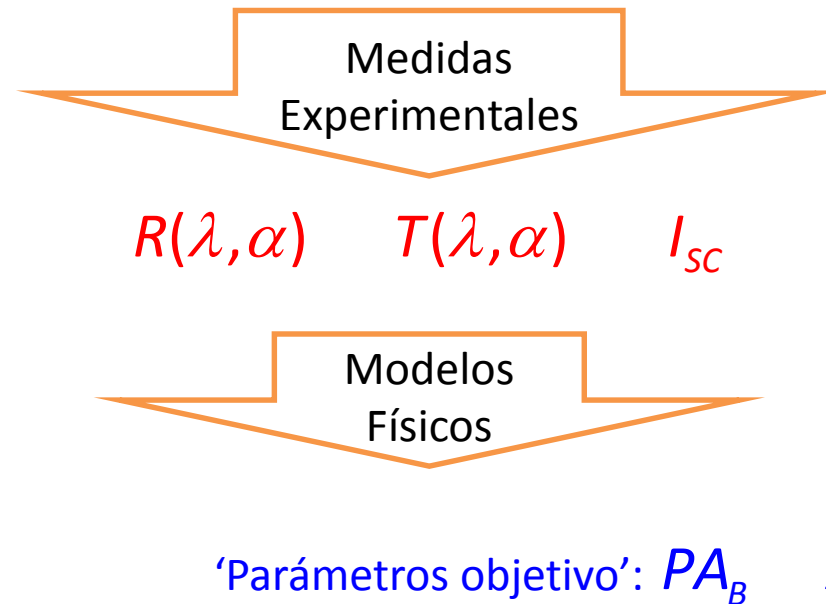
Caracterización Óptica de Módulos Fotovoltaicos Semitransparentes de *a-Si* para Integración en Edificios Comerciales

Francisco J. Moralejo Vázquez

Madrid, 25 Julio 2013

Motivación & Objetivos

- Las directivas y recomendaciones enfocadas al rendimiento energético eficiente en la edificación proponen sólidas bases de cálculo con fundamento técnico
- La inferencia del rendimiento final de los sistemas fotovoltaicos multifuncionales para edificación (*BIPV*) mediante simulaciones requieren de un conocimiento previo de los parámetros característicos de los mismos.



‘Parámetros objetivo’

- Las pérdidas angulares, en el caso de sistemas de inclinación tan desfavorable como son las fachadas, inciden fuertemente en el rendimiento eléctrico.

$$1 - PA_B = \frac{I_{sc}(\alpha)}{I_{sc}(0) \cdot \cos(\alpha)} = \frac{1 - \bar{R}(\alpha)}{1 - \bar{R}(0)}; \quad \bar{R}(\alpha) = \frac{\int G(\lambda) R(\lambda, \alpha) SR(\lambda) d\lambda}{\int G(\lambda) SR(\lambda) d\lambda}$$

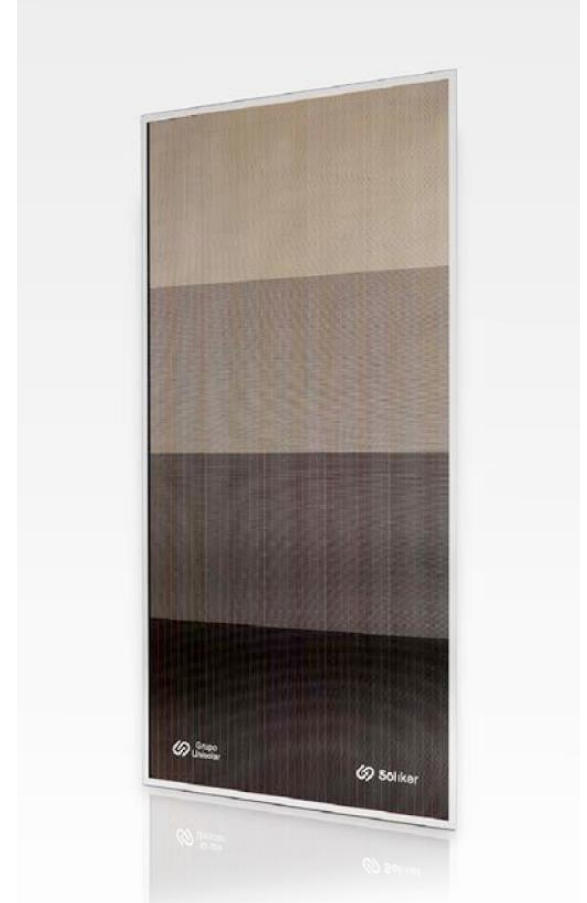
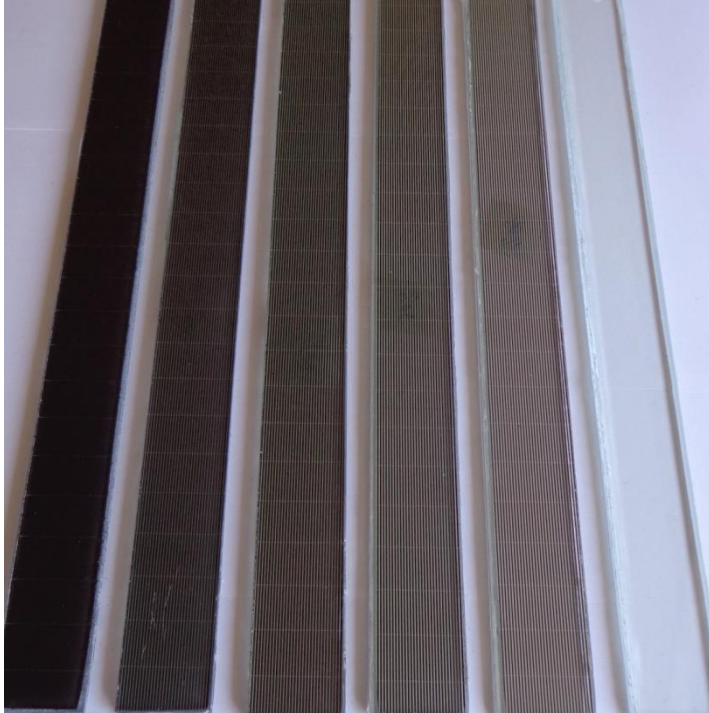
- La posibilidad del aprovechamiento de la iluminación natural es crucial tanto desde el punto de vista de eficiencia energética como de salubridad del edificio

$$\tau_v(\alpha) = \frac{\int_{380nm}^{780nm} D(\lambda) T(\lambda, \alpha) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} D(\lambda) V(\lambda) d\lambda}$$

- La carga térmica para el edificio y la disipación de calor del módulo son críticas para el rendimiento energético de ambos

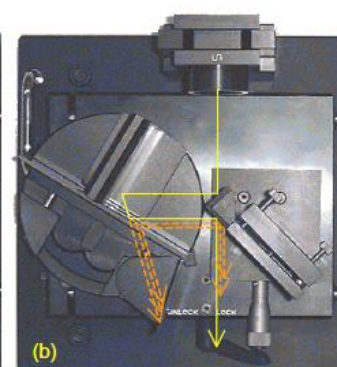
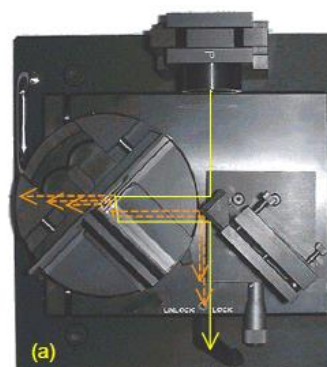
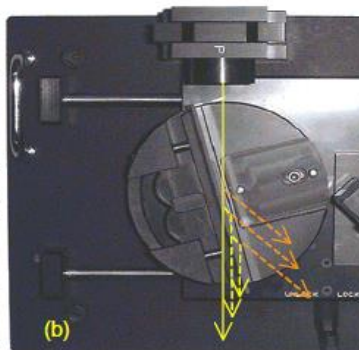
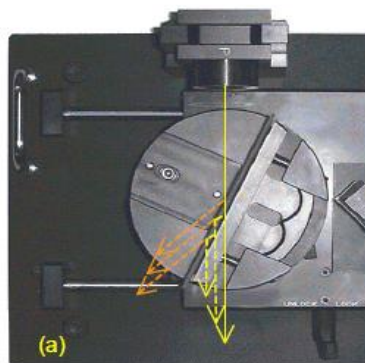
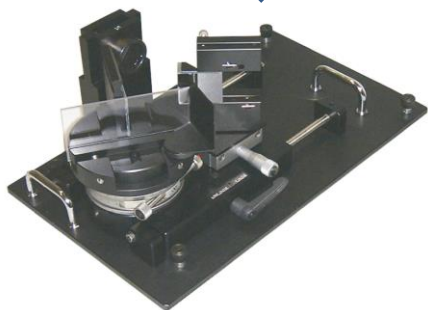
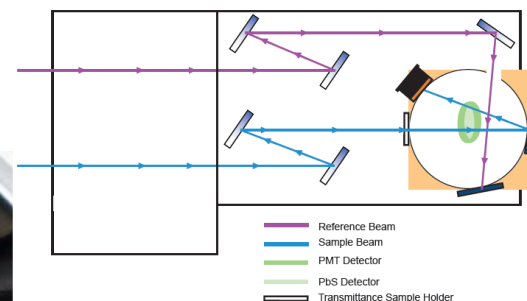
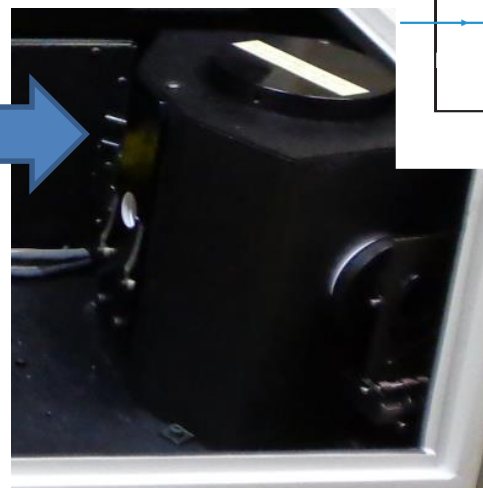
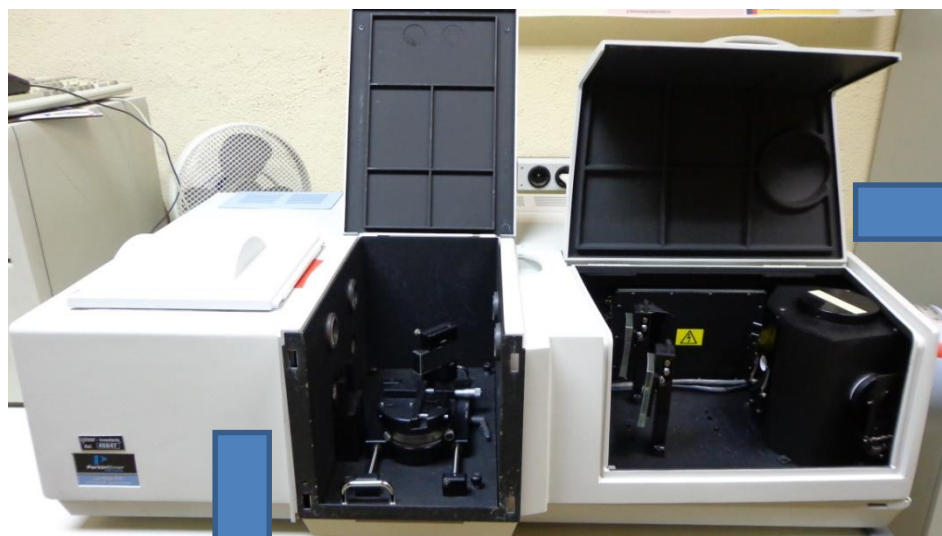
$$g = \tau_e(\alpha) + q_{int} = \frac{\int_{300nm}^{2500nm} S(\lambda) T(\lambda, \alpha) d\lambda}{\int_{300nm}^{2500nm} S(\lambda) d\lambda} + q_{int}; \quad A'(\lambda, \alpha) = 1 - R(\lambda, \alpha) - T(\lambda, \alpha)$$

Caracterización Óptica

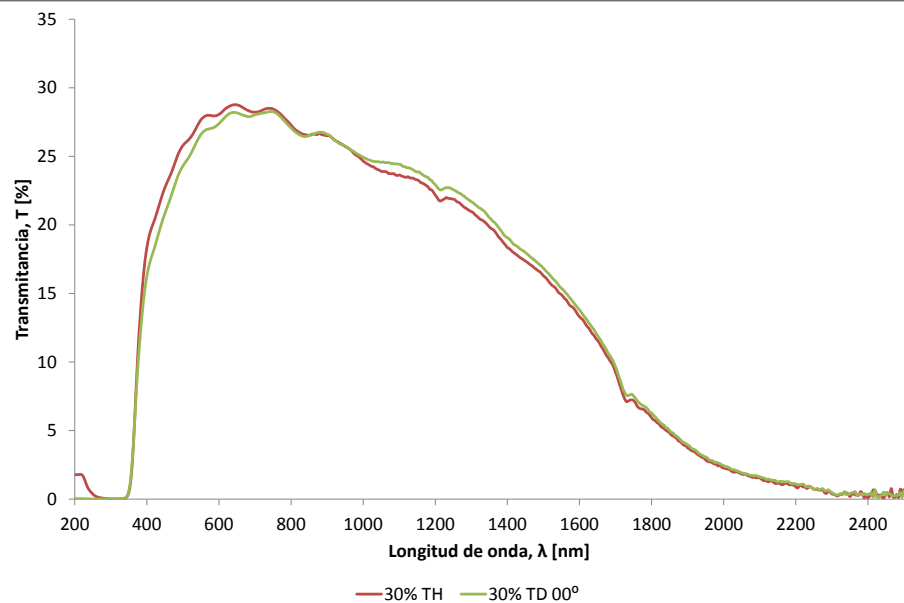


Medida $R(\lambda, \alpha)$ y $T(\lambda, \alpha)$

- Equipo utilizado: Espectrofotómetro Perkin Elmer 900 dotado de dos accesorios específicos:
 - Complemento R/T para medida de $R(\lambda, \alpha)$ y $T(\lambda, \alpha)$ direccionales de TNO Institute of Applied Physics.
 - Esfera integradora LabSphere 150 mm.

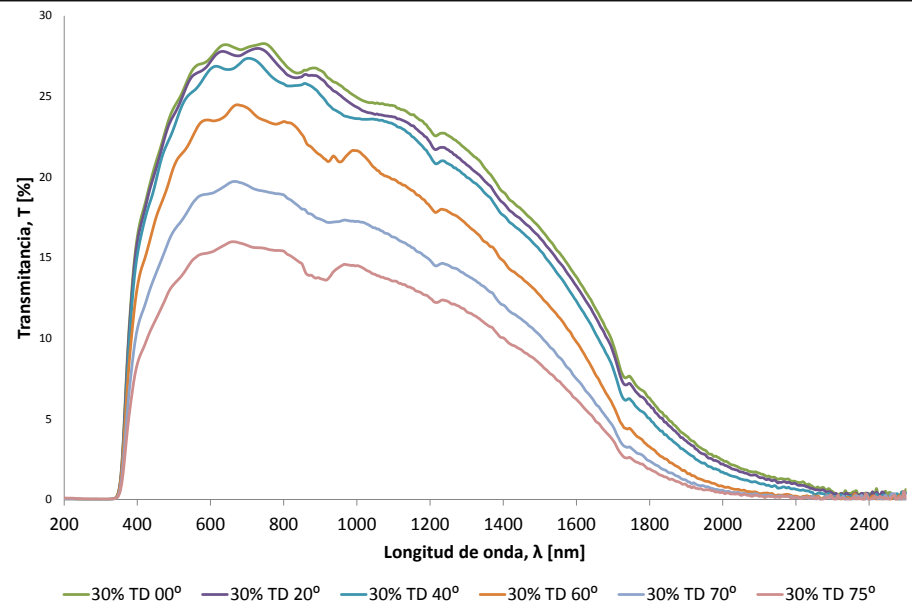


Medida $T(\lambda, \alpha)$ y $R(\lambda, \alpha)$

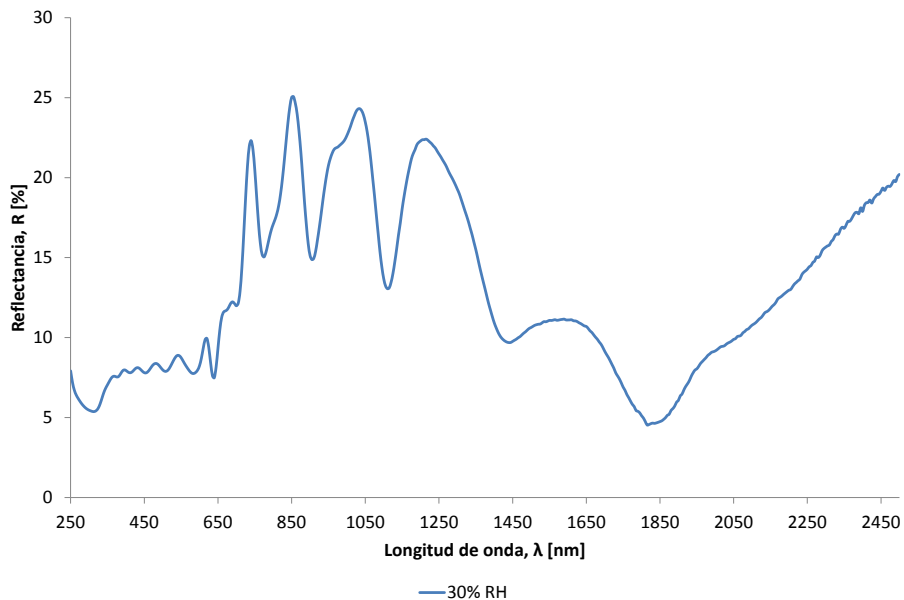


Primer paso: Verificación de la specularidad de la transmitancia de la muestra

Segundo paso: Medida de las transmitancias espectrales para ángulos 0°, 20°, 40°, 60°, 70°, y 75°

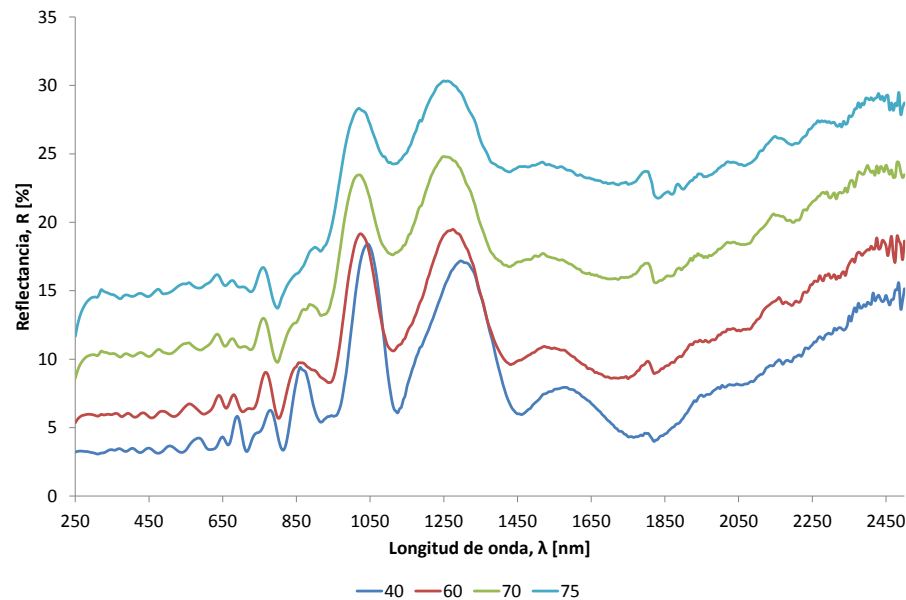


Medida $T(\lambda, \alpha)$ y $R(\lambda, \alpha)$

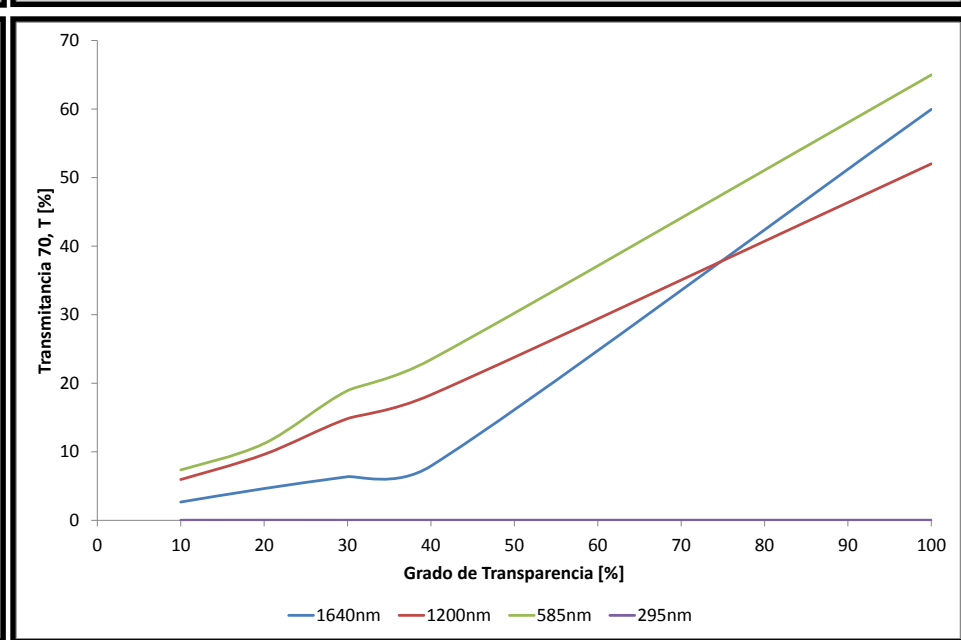
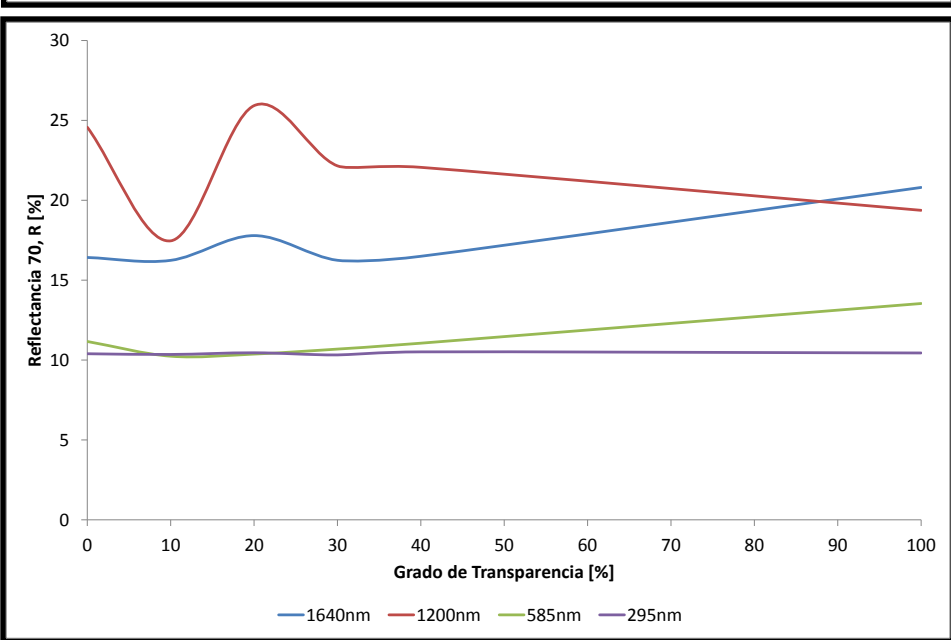
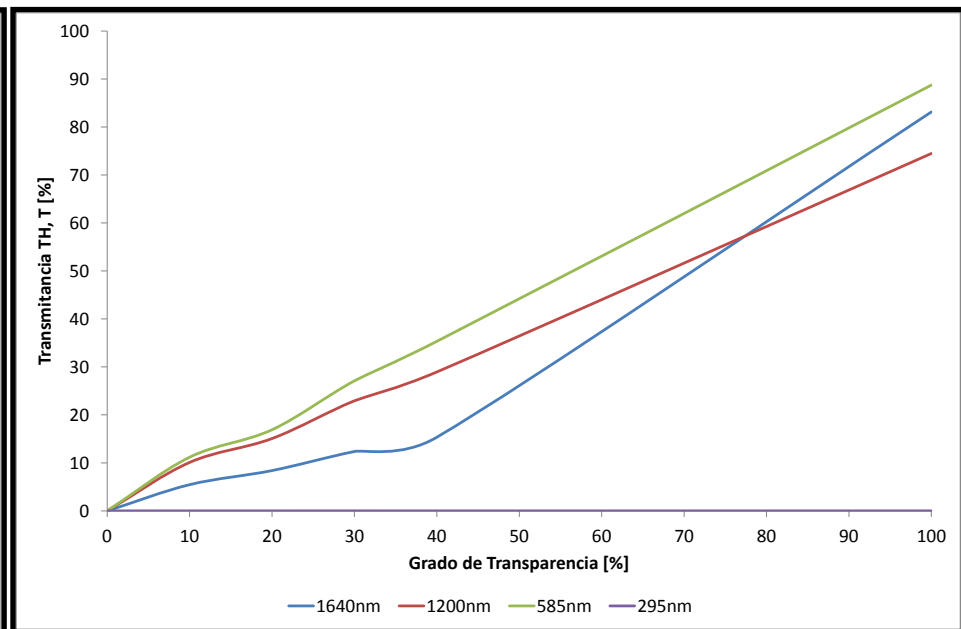
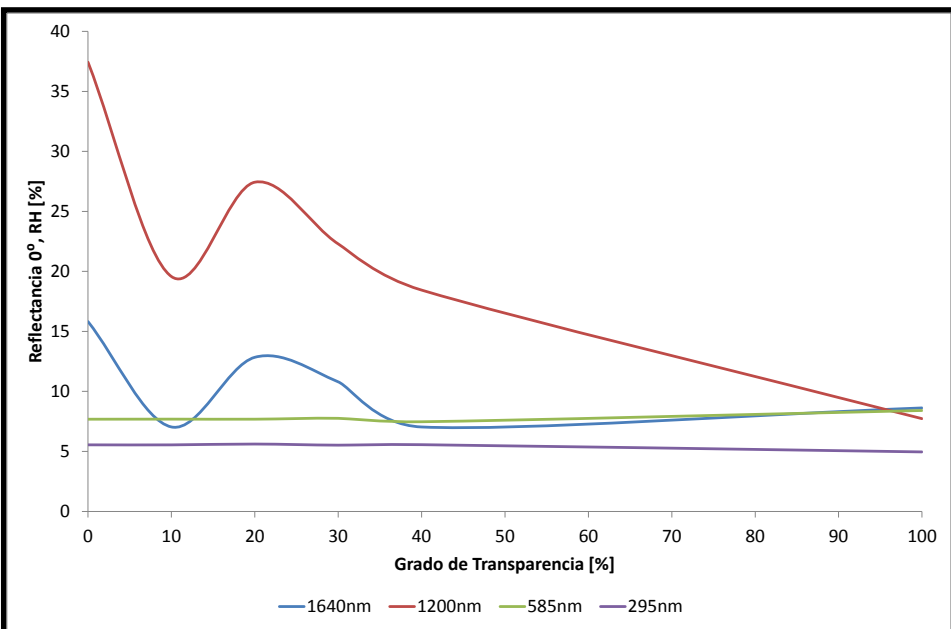


Tercer paso: Medida de la reflectancia espectral en incidencia normal

Cuarto paso: Medida de las reflectancias espectrales para ángulos 40° , 60° , 70° , y 75°



Medida $T(\lambda, \alpha)$ y $R(\lambda, \alpha)$



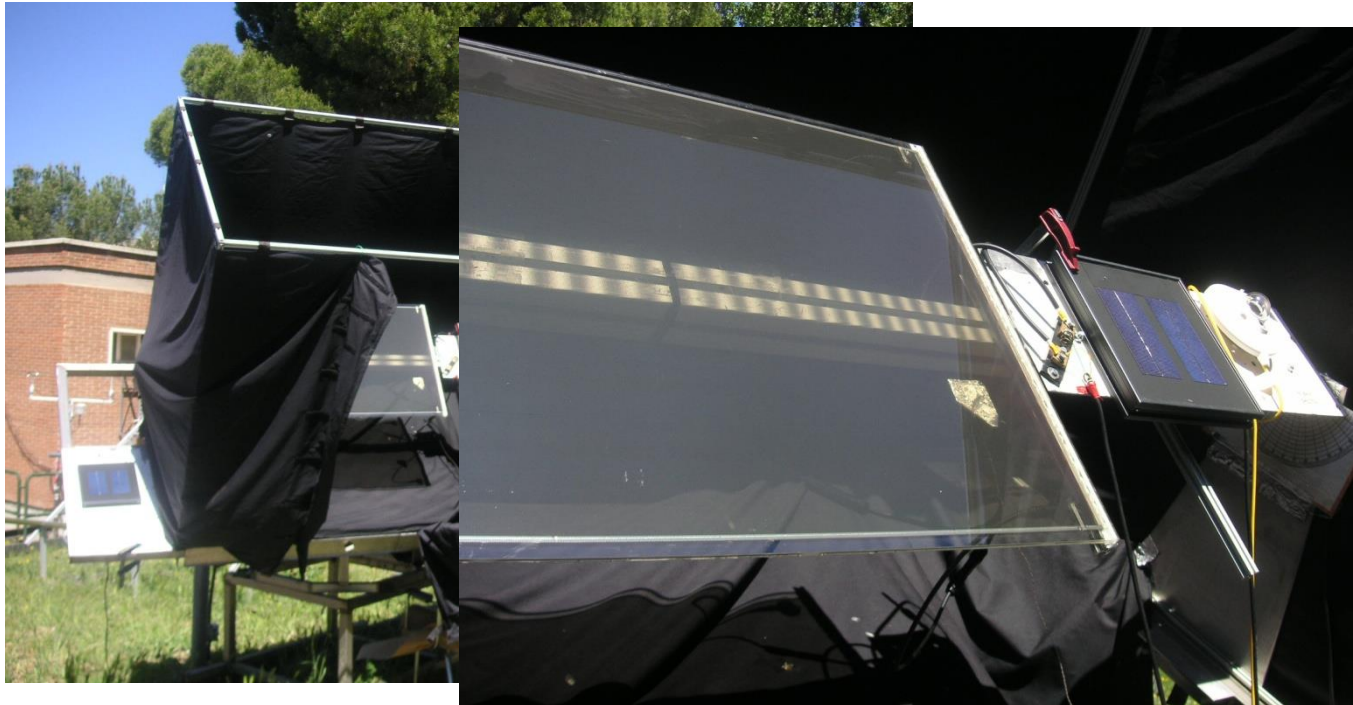
Medida Influencia Angular

- Equipos utilizados: Estructura de seguimiento con la siguiente monitorización:
 - Piranómetro Kipp Zonen CMP 21 ($8,85\text{mV}/1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$).
 - 2 Mini-módulos Atersa calibrados y compensados en temperatura (coef. T menor $10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$).
 - Potenciómetro calibrado (1 vuelta y 1000Ω).
 - Termopar adherido a la parte trasera del módulo.
 - Datalogger Agilent mod. 34970A.



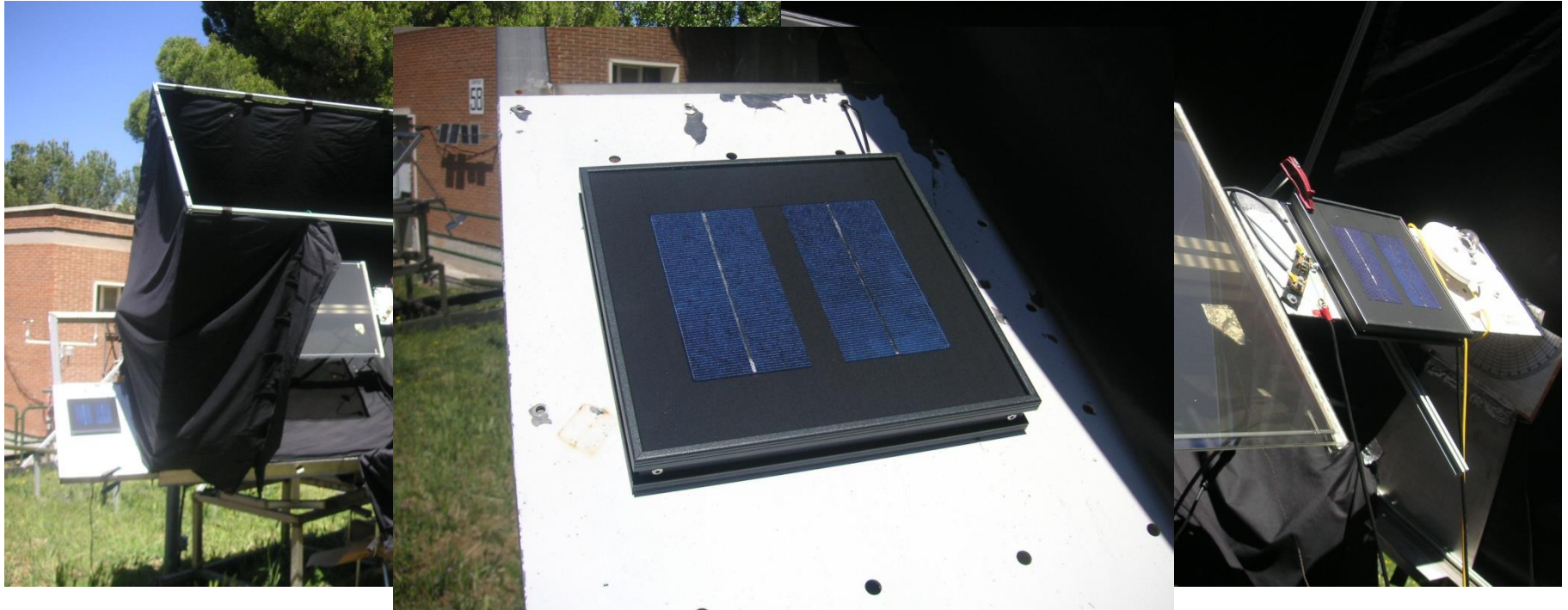
Medida Influencia Angular

- Equipos utilizados: Estructura de seguimiento con la siguiente monitorización:
 - Piranómetro Kipp Zonen CMP 21 ($8,85\text{mV}/1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$).
 - 2 Mini-módulos Atersa calibrados y compensados en temperatura (coef. T menor $10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$).
 - Potenciómetro calibrado (1 vuelta y 1000Ω).
 - Termopar adherido a la parte trasera del módulo.
 - Datalogger Agilent mod. 34970A.



Medida Influencia Angular

- Equipos utilizados: Estructura de seguimiento con la siguiente monitorización:
 - Piranómetro Kipp Zonen CMP 21 ($8,85\text{mV}/1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$).
 - 2 Mini-módulos Atersa calibrados y compensados en temperatura (coef. T menor $10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$).
 - Potenciómetro calibrado (1 vuelta y 1000Ω).
 - Termopar adherido a la parte trasera del módulo.
 - Datalogger Agilent mod. 34970A.



Medida Influencia Angular

- Equipos utilizados: Estructura de seguimiento con la siguiente monitorización:
 - Piranómetro Kipp Zonen CMP 21 ($8,85\text{mV}/1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$).
 - 2 Mini-módulos Atersa calibrados y compensados en temperatura (coef. T menor $10\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$).
 - Potenciómetro calibrado (1 vuelta y 1000Ω).
 - Termopar adherido a la parte trasera del módulo.
 - Datalogger Agilent mod. 34970A.



Medida Influencia Angular

- Información recogida por cada equipo:
 - Potenciometro: Se recogen las lecturas visual y de voltaje al situar en cada ángulo la estructura. Con las lecturas parciales se realiza un calibrado del potenciómetro para transformar las lecturas en la toma de datos posterior.
 - Mini-módulo Atersa fijo orientado continuamente al Sol. Monitoriza las fluctuaciones instantáneas de la irradiancia sobre el plano no afectado por el efecto coseno.
 - Piranómetro Kipp Zonen CMP 21 ($8,85\text{mV}/1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$): Monitoriza la irradiancia global que alcanza el módulo. Se corrige por la célula fija orientada al Sol y se le incluye el efecto coseno para dar cuenta de la irradiancia sobre el plano geométrico de captación.
 - Termopar: Situado sobre la cara posterior del módulo en estudio monitoria la temperatura del módulo..
 - Mini-módulo Atersa y módulo en estudio con movimiento solidario:..Ambos módulos son corregidos de fluctuaciones de irradiancia, se les ha eliminado la contribución difusa que pudiera filtrarse en el montaje, el módulo se ha referenciado a la temperatura media de operación y se ha calculado su corriente de cortocircuito a partir de la calibración en el laboratorio del Ciemat y a partir del shunt, respectivamente, incluyéndose también el efecto coseno.
 - EJEMPLO: Módulo Soliker Solglass e 3+3:

ÁNGULO	ISC (A) C. Operación	ÁNGULO	ISC (A) M. Laboratorio	Ratio
1,091	0,60			
21,376	0,56			
41,332	0,46	40	0,53	1,17
61,082	0,27	60	0,34	1,24
69,753	0,17	70	0,22	1,26
74,966	0,11	75	0,16	1,42

Primeros resultados

$\bar{T}(\alpha)$

	0°	20°	40°	60°	70°	75°
10 %	10,2	10,1	9,7	8,0	6,6	5,4
20 %	15,3	15,0	14,7	12,4	9,9	7,3
30 %	24,9	24,6	23,8	21,1	17,1	13,8
40 %	32,3	31,9	31,0	26,3	21,1	16,9

$\bar{R}(\alpha)$

	0°	40°	60°	70°	75°
10 %	8,7	3,5	6,2	10,7	15,0
20 %	8,9	3,5	6,1	10,7	15,25
30 %	5,5	3,2	6,0	10,3	14,5
40 %	5,6	3,2	6,0	10,5	14,5

$\bar{A}'(\alpha)$

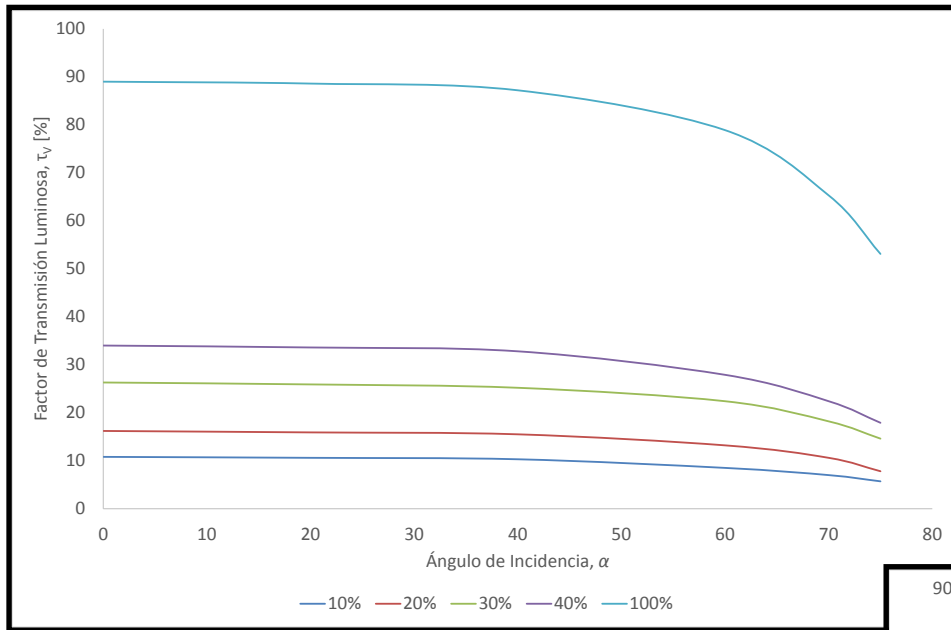
	0°	40°	60°	70°	75°
10 %	81,1	86,8	85,8	82,8	79,7
20 %	75,8	81,9	81,5	79,4	77,5
30 %	69,6	73,0	72,9	72,6	71,7
40 %	62,1	65,8	67,7	68,4	68,7

τ_v	0°	20°	40°	60°	70°	75°
10 %	10,8	10,6	10,3	8,5	7,0	5,7
20 %	16,2	15,9	15,5	13,2	10,6	7,8
30 %	26,3	25,9	25,2	22,4	18,2	14,6
40 %	34,0	33,6	32,8	27,9	22,4	17,9
100 %	89,0	88,6	87,2	78,9	65,3	53,1

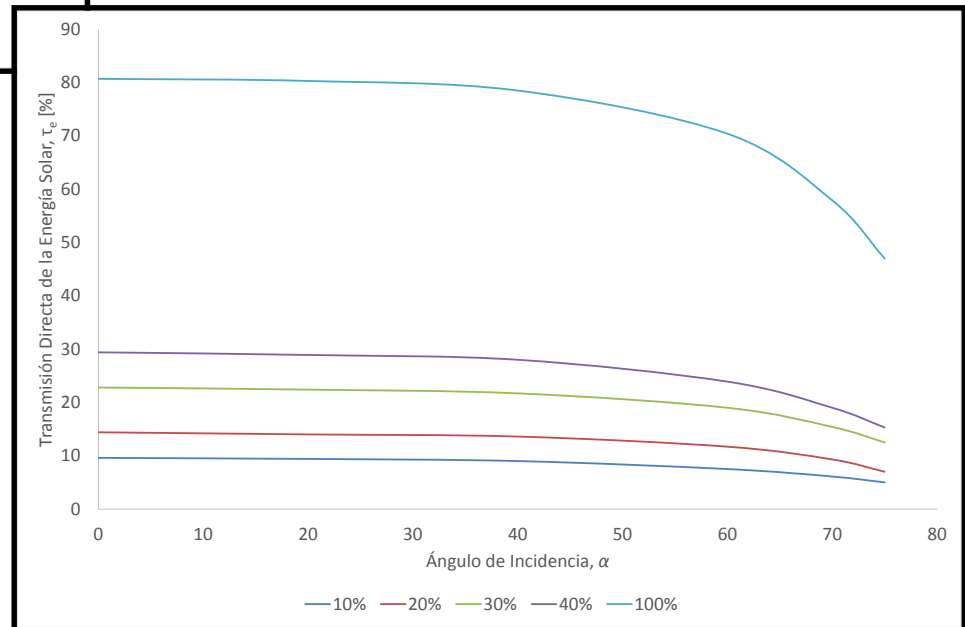
τ_e	0°	20°	40°	60°	70°	75°
10 %	9,6	9,4	9,0	7,5	6,1	5,0
20 %	14,4	14,0	13,6	11,7	9,3	7,0
30 %	22,8	22,4	21,7	19,0	15,4	12,5
40 %	29,4	28,9	28,0	23,9	19,0	15,3
100 %	80,7	80,3	78,5	70,4	57,9	47,0

Primeros resultados

Factor de Transmisión Luminosa Norma CEN EN-410:2011



Factor de Transmisión Directa de la Energía Solar Norma CEN EN-410:2011



Conclusiones. Líneas futuras

- La correcta caracterización eléctrica, mecánica, óptica y térmica de los módulos fotovoltaicos multifuncionales para edificación, *BIPV*, son requisito imprescindible para cumplir las expectativas de eficiencia energética en la edificación.
- Las características ópticas de reflectancia y transmitancia espectrales son clave para la descripción de distintos parámetros asociados, no sólo con el rendimiento óptico del módulo multifuncional, sino también con aspectos lumínicos, y térmicos.
- Se ha conseguido, a través de técnicas comúnmente destinadas a la caracterización de los vidrios para edificación, medir correctamente dichos parámetros en laboratorio.
- Se han dado los primeros pasos para, aprovechando dichas medidas, comenzar a evaluar algunos parámetros útiles para la evaluación de envolventes fotovoltaicas. Dos de ellos, los factores de transmisión luminosa y de transmisión directa de la energía solar.
- Completar el estudio calculando el factor de pérdidas angulares, y profundizar en los aspectos térmicos asociados a este tipo de envolventes.
- Finalmente, utilizar el juego de parámetros obtenidos para ensayar con algún simulador el efecto que produciría una fachada de este tipo en un edificio real.

Agradecimientos



POLITÉCNICA

Instituto de Energía Solar



Soliker



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

